

УДК 621.791.052:539.4

Д. М. Шахматов, М. В. Шахматов

ООО «ЦПС Сварка и Контроль»,

г. Челябинск

РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ КАНАВКИ

В докладе приведена методика контроля остаточных сварочных напряжений на основе создания на поверхности сварного соединения неглубокой протяженной канавки с последующей регистрацией измененного напряженно-деформированного состояния методом голографической интерферометрии.

Ключевые слова: *остаточные сварочные напряжения, канавка, голографическая интерферометрия.*

D. M. Shakhmatov, M. V. Shakhmatov

DEVELOPMENT OF RESIDUAL WELDING STRESSES CONTROL BY GROOVE FORMING TECHNIQUE

The report describes the technique of the residual welding stresses control on the basis of shallow long length groove forming on the surface of a welded joint succeeded by the stress-strain state registration by the hologram interferometry.

Keywords: *residual welding stresses, groove, hologram interferometry.*

При оценки прочности сварных соединений важное значение имеет информация о реальных величинах и распределении остаточных сварочных напряжений (ОСН). Для их определения широкое распространение получили экспериментальные методы, основанные на перераспределении ОСН при нанесении какого либо концентратора или их полном снятии путем разрезки с регистрацией упругих деформаций. В последнем случае методы достаточно трудоемки и поэтому очевидна тенденция к разработке малоразрушающих методов: метод отверстия метод [1]; канавки [2] и др. Метод отверстия при несомненных его достоинствах (таких как минимальная деструкция соединения, простота обработки экспериментальных данных) все же не лишен

ряда недостатков. В частности: ограниченная чувствительность, высокая степень дискретности результатов, сложность определения знака ОСН, усреднение результатов на базе диаметра отверстия. Избежать данных недостатков в ряде случаев позволяет предлагаемый нами метод, заключающийся в создании неглубокой канавки при голографической регистрации возмущенного деформированного состояния поверхности сварного соединения.

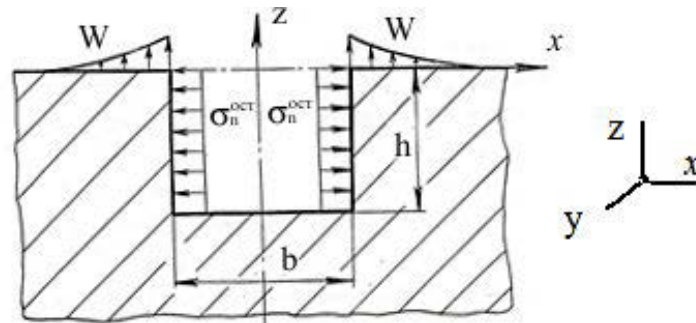


Рис. 1. Расчетная схема метода канавки

Анализ расчетной схемы метода канавки, представленной на рис. 1, показывает, что метод чувствителен к перпендикулярным по отношению к канавки ОСН, совпадающим с осью x . При этом избирательная чувствительность проявляется по всей длине канавки (за исключением краевой зоны, размер которой равен удвоенной ширине данной канавки $L = 2b$, при ее глубине $h > b$ или $L = 2h$, при $h < b$). Достаточно протяженную канавку можно рассматривать как узкую щель в плоском поле главных напряжений, в котором $\sigma_z = 0$. Произвольное распределение ОСН на кромках канавки можно представить как большое число нагрузок переменной интенсивности q , действующих на малые элементы границы. Тогда согласно [3] напряжения σ_x и σ_y (см. рис. 1) под любым элементом границы канавки, глубиной h_{Π} будет полностью связано с этим элементом. При этом $\sigma_x = \sigma_y = -q$. Из закона Гука и соотношения Коши для плоского напряженного состояния определим деформации вдоль оси z и перемещения W (см. рис. 1).

$$\varepsilon_z = -\frac{\mu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) = 2\mu q/E; \quad (1)$$

$$W = 0,5 \varepsilon_z h_{\pi} = \frac{\mu}{E} h p q, \quad (2)$$

где E , μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно.

Из выражения (2) следует важный вывод о том, что величина нормального к плоскости сварного соединения перемещения W в любой точке границы канавки полностью связана с соответствующим элементом нагрузки и полностью им определяется. Так как интенсивность нагрузки q в данном случае совпадает с ОСН, действующими перпендикулярно канавки, представим связь между существующими до выполнения канавки ОСН ($\sigma_n^{\text{ост}}$) и возникающими вследствие нанесения канавки нормальными перемещениями W в следующем виде:

$$\sigma_n^{\text{ост}} = k W, \quad (3)$$

где k – коэффициент пропорциональности. Значение данного коэффициента определяется конкретным способом измерения величины перемещения W . В качестве измерителя перемещений W был применен способ голографической интерферометрии. Следует отметить, что данный способ обладает преимущественной чувствительностью к нормальной к плоскости сварного соединения составляющей перемещений W . В этом случае коэффициент « k » будет постоянен для конкретной оптической схемы интерферометра:

$$k = \frac{\sigma_n^{\text{ост}}}{W} = \frac{\sigma_{no}^{\text{ост}}}{W_o}. \quad (4)$$

тогда формулу (3) можно представить с учетом (4):

$$\sigma_n^{\text{ост}} = \sigma_{no}^{\text{ост}} \frac{W}{W_o}, \quad (5)$$

где W – измеряемая методом голографической интерферометрии (рис. 2) величина нормального перемещения от перераспределения ОСН при нанесении канавки; W_o – величина нормального перемещения, возникающего под действием единичного остаточного напряжения $\sigma_{no}^{\text{ост}}$.

По получаемой интерференционной картине перемещения W определяется из следующего выражения [1]:

$$W = \frac{N\lambda}{\cos\alpha_H + \cos\alpha_O}, \quad (6)$$

где N – номер интерференционной полосы, проходящей через рассматриваемую точку; α_H ; α_O – углы наблюдения и освещения поверхности объекта в оптической схеме интерферометра (рис.2); λ – длина волны лазера.

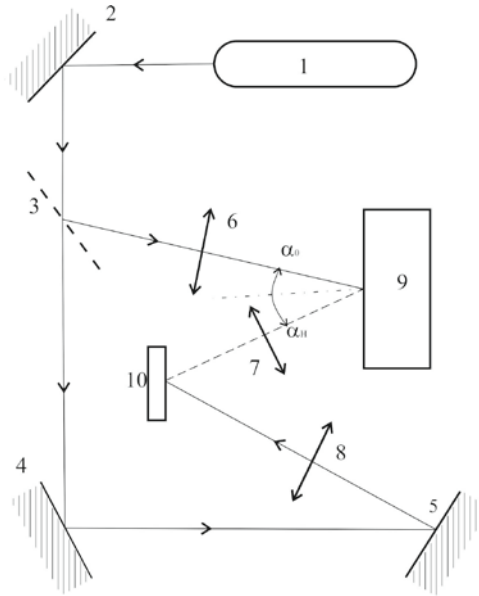


Рис. 2. Оптическая схема интерферометра: 1 – лазер; 2,4,5 – зеркала; 3 – делитель; 6,8 – микрообъективы; 7 – проецирующий объектив; 9 – сварное соединение; 10 – детектор

Представим выражение (5) следующим образом:

$$\sigma_n^{\text{ост}} = \sigma_{n1}^{\text{ост}} N. \quad (7)$$

Здесь $\sigma_{n1}^{\text{ост}} = \frac{\sigma_{n0}^{\text{ост}}}{N_o}$, где N_o – номер полосы, соответствующей перемещению W_o .

Величина $\sigma_{n1}^{\text{ост}}$ представляет собой напряжение, вызывающее появление первой интерференционной полосы на голограмме. То есть данная величина является чувствительностью голографического интерферометра и задача сводиться к её определению. Решая плоскую задачу теории упругости с выточкой на полуплоскости, нагруженной по краям распределенной нагрузкой методом конечных элементов (МКЭ) и проводя соответствующие тарировки, было установлено, что чувствительность метода определяется глубиной канавки h , а ширина b (см. рис. 1) является базой усреднения результатов. На

рис. 3. приведены данные об изменении чувствительности интерферометра $\sigma_{n1}^{ост}$ в зависимости от глубины канавки.

Данные на рис. 3 получены для идеализированной оптической схемы $\cos\alpha_n = \cos\alpha_o \rightarrow 1$ для материала, свойства которого принимали за единичные с модулем упругости $E = 1 \cdot 10^5$ МПа. Для реальной оптической схемы с произвольными углами освещения и наблюдения (α_o^*, α_n^*) и реального материала с модулем упругости E^* чувствительность интерферометра $(\sigma_{n1}^{ост})^*$ определяется по следующей зависимости :

$$(\sigma_{n1}^{ост})^* = \sigma_{n1}^{ост} \frac{E^*}{E} \frac{2}{\cos\alpha_o^* + \cos\alpha_n^*}. \quad (8)$$

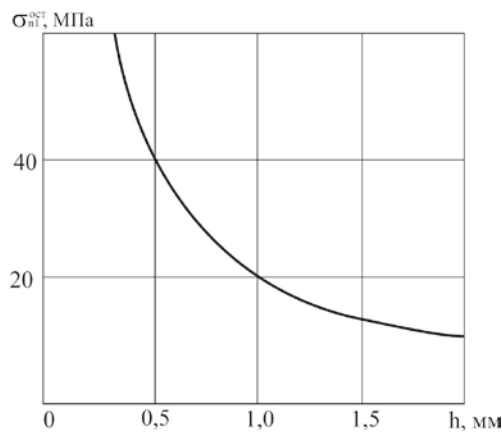


Рис. 3. Зависимость чувствительности $\sigma_{n1}^{ост}$ от глубины канавки

Техника проведения эксперимента состояла в следующем. На жесткой голографической плите собирали оптическую схему с $\alpha_o^* = \alpha_n^* = 25^\circ$. Применяли лазер с фиксированной длиной волны $0,6328 \cdot 10^{-3}$ мм, оптические элементы и крепежные приспособления, а также детектор, в качестве которого использовали фотопластинку типа ВР-Л (см. рис. 2). Сварные соединения жестко крепили на плите. Методом двух экспозиций записывали на детекторе голограмму освещенной поверхности соединения. При этом на первой стадии регистрировали исходное состояние поверхности, затем создавали канавку без изменения исходного местоположения образца и повторно регистрировали деформированное состояние поверхности. Ширина канавки $b = 0,6 \dots 0,8$ мм; глубина $h = 0,7 \dots 0,8$ мм. После соответствующей обработки фотопластинки

(детектора), ее помещали в опорный пучок. При этом восстанавливалась голограмма поверхности соединения, а полосы на данной голограмме являлись линиями равных нормальных перемещений. В дальнейшем проводили расчет ОСН по формулам (7) и (8). Чувствительность интерферометра составляла в среднем 32 МПа ($\sigma_{n1}^{ост} = 32$ МПа).

Разработанная методика была апробирована на сварных соединениях из различных сталей и сплавов. В частности приведем некоторые данные по сварным соединениям из титановых сплавов, выполненных в щелевую разделку кромок. Основной металл – сплав типа ВТ-6С (предел текучести $\sigma_T = 770$ МПа, металл шва – сплав типа ВТ-5 (предел текучести $\sigma_T = 650$ МПа) модуль упругости сплавов $E = 1,18 \cdot 10^5$ МПа. Голограммы участка образца, захватывающего сварной шов с шириной $B = 18$ мм (толщина пластины 20 мм) и остаточные напряжения σ_x / σ_T представлены на рис.4.

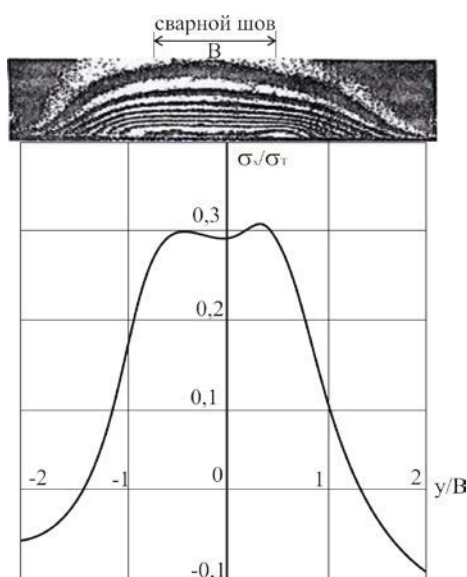


Рис. 4. Интерференционные полосы и участок эпюры остаточных напряжений σ_x / σ_T для сварной пластины из титанового сплава

Знак ОСН достаточно легко определяется путем внедрения шарового индентора (или по отпечатку переносного твердомера) в участок интерференционной картины. Если ОСН - растягивающие, то полосы огибают рельеф от индентора, если ОСН – сжатия, полосы втягиваются в данный рельеф.

Список литературы

1. Антонов А. А. Разработка методики и оборудования голографического контроля остаточных напряжений // Сварочное производство. – 1983. – № 12. – С. 26–28.
2. Михайлов О. Н. Метод канавки // Остаточные напряжения в заготовках и деталях крупных машин : сб. научных трудов. – Свердловск : УПИ. – 1971. – С. 35–37.
3. Тимошенко С. П., Гудьер Д. Теория упругости. – М. : Наука. – 1979. – 560 с.